МАШИНОЗНАВСТВО ТА ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ В МАШИНОБУДУВАННІ

УДК 621.78/(66.088+537.52+66.046)

І.М. ПАСТУХ, В.В. ЛЮХОВЕЦЬ, М. В. ЛУК'ЯНЮК
Хмельницький національний університет

АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ АЗОТУВАННЯ В ТЛІЮЧОМУ РОЗРЯДІ ОТВОРІВ З ВІДНОСНО МАЛИМ ДІАМЕТРОМ

Викладені результати аналізу впливу на характер процесів, які мають місце при азотуванні отворів з відносно малим діаметром, співвідношень розмірів отворів та геометричних характеристик області катодного падіння. Сформовано концептуальні підходи до аналітичного розв'язання задач, що описують умови якісної модифікації деталей з робочими поверхнями у вигляді отворів невеликого діаметра та відносно значної довжини.

Ключові слова: отвори, відносно малий діаметр, азотування, тліючий розряд.

I.M. PASTUKH, V.V. LUKHOVEC, M.V. LUK'YANYUK
Khmelnytsky National University

THE ANALYSIS PROCESSES NITRATION BY GLOW DISCHARGE OPENINGS WITH RELATIVELY SMALL DIAMETER

Abstract – The results of the analysis of the influence of the geometry of the openings with a relatively small diameter on the nature of the processes of nitriding in a glow discharge. Formed the concept of analytical tasks that ensure high-quality glow discharge nitriding parts with working surfaces in the form of relatively small-diameter openings and a relatively large length. Classified by condition effect of the ratio of aperture size and the cathode fall of a gas discharge

Keywords: nitration, glow discharge, openings, relatively small diameters.

Вступ

Важливість для реального виробництва дослідження модифікації деталей з робочими поверхнями у вигляді отворів відносно малого діаметра проаналізована в [1]. Очевидно, що переважна більшість випадків стосовно процесів азотування в тліючому розряді подібних об'єктів модифікації відповідає за своїм фундаментальними ознаками газорозрядним процесам з пустотілим катодом [2, 3]. Проте підлягає окремому аналізу вплив на характер процесів обробки співвідношень розмірів отворів та геометричних характеристик власне газового розряду. У цьому випадку насамперед мається на увазі наступне. Б. І. Москальов вважає, що електрони з відносно малим перетином сутичок рухаються як у вакуумі, їхня траєкторія не співпадає з силовими лініями поля. Іони ж навпаки, маючи значний перетин резонансної перезарядки, що пояснюється, в першу чергу, малими значеннями швидкості, особливо на початкових стадіях після утворення іонів, рухаються внаслідок багаторазових сутичок траєкторією, яка практично співпадає з силовими лініями поля. Відзначається, що імпульсний струм живлення розряду допускає значно більші значення сили струму. При цьому не спостерігаються переходи тліючого розряду в дуговий, оскільки реально тривалість розряду має значення порядку мікросекунд при частоті, що вимірюється кілогерцами. Аналіз розмірних параметрів області катодного падіння (ОКП) напруги розряду, виконаних в [2], свідчить про те, що розряд з пустотілим катодом характеризується малою протяжністю зони темного катодного простору (порівняно із звичайним аномальним розрядом), тому цей діапазон ОКП іони та електрони проходять практично без сутичок. Практично всі дослідники розряду з пустотілим катодом [2, 4] вважають, що головною ознакою кваліфікації розряду за типом як з пустотілим катодом є умова хоча б часткового або повного перекриття зон негативного свічення від різних (протилежних) частин катода. Тільки у цьому випадку виникає ефект розряду з пустотілим катодом. В [4] відзначається, що існує тотожність між початком зростання струму розряду та моментом перекриття зон негативного свічення ОКП від двох протилежних частин катода. Очевидним з цього факту є висновок, що аналіз процесів азотування в тліючому розряді отворів відносно малого діаметра в обов'язковому порядку повинен враховувати співвідношення розмірів цих отворів з геометричними параметрами ОКП. З цієї причини не сприймаються рекомендації, викладені в [3], де категорично стверджується, що критичним діаметром отворів, які слід азотувати в певних особливих умовах, наприклад – з переривчастим живленням розряду при частоті порядку декількох кілогерц, є значення 8 мм. При цьому вказаний розмірний параметр абсолютно не співвідноситься з характеристиками режиму азотування, більшість з яких є вирішальним для розмірів ОКП, тобто першочергово визначають появу ефекту розряду з пустотілим катодом. Важливо також зазначити, що в [2] прямо вказується на те, що теорія, яка викладена в джерелах, присвячених особливостям розряду з пустотілим катодом, не ставить собі за мету проведення якісного оцінювання переходу від тліючого розряду в розряд з пустотілим катодом або, тим більше - абсолютні величини параметрів розряду (падіння напруги, густина струму і т. ін.). Позитивно також слід оцінювати пропозицію враховувати у складі падаючого на катод потік швидких нейтральних атомів, котрі утворились як наслідок перезарядки іонів, проте конкретної реалізації цієї тези (на відміну, наприклад, від [5]) не наводиться.

З викладеного аналізу джерел очевидна необхідність дослідження азотування отворів з відносно

малим діаметром в тліючому розряді на основі саме теорії газорозрядних процесів. При цьому особливу роль відіграють характеристики розряду, рівно як і параметри потоків часток, що бомбардують поверхню.

Попередні передумови аналізу

Схема умовного розподілу напруги катодного падіння в околі отвору показана на рис. 1. Попередньо введемо наступні передумови, маючи на увазі, що головна мета цієї процедури полягає у спрощенні постановки завдання початкового аналізу. Передумови зводяться до наступного:

а) стік часток, які формують падаючий потік в зоні торця отвору, прямо пропорційний напруженості поля;

б) швидкість ковзання цих часток в стокові постійна для всіх ділянок з однаковою напруженістю поля;

в) потік часток на анодній межі ОКП прямо пропорційний напруженості поля на протилежній ділянці катода;

г) напруженість поля вздовж ділянки катода змінюється по певному монотонному закону;

д) міжелектродне падіння напруги по всій поверхні катода умовно однакове.

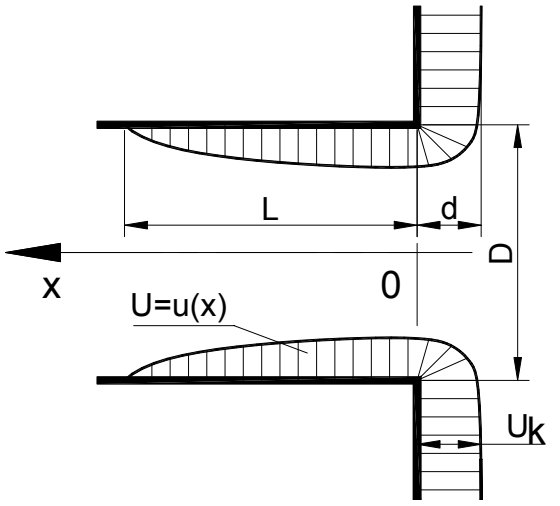

Рис. 1. Схема параметрів розряду в отворі

Для попередніх викладок прийнято лінійний закон зміни напруженості поля з можливим наступним корегуванням характеру зміни. Виходячи із зазначених вище передумов, число часток, які стікають через площу отвору анодної межі ОКП за одиницю часу для компенсації часток, котрі у вигляді іонів та швидких нейтральних часток бомбардують поверхню,

$$n_{DS} = n\, V_S \cdot \frac{\pi\, D^2}{4},$$

де n – концентрація часток в газовому середовищі в одиниці об'єму,

V_S – швидкість ковзання часток в газовому середовищі на анодній межі ОКП.

Очевидно, що швидкість ковзання у зв'язку з нерівномірним розподілом напруженості по поверхні стінок отвору буде неоднаковою. Тому середнє значення швидкості ковзання в зоні стінок отвору при лінійному законі розподілу напруженості поля

$$\overline{V_S} = \frac{1}{2} V_S \cdot L/L = 0{,}5\, V_S\,.$$

Кількість часток, що бомбардують стінки отвору

$$n_{LS} = \overline{V_S} \cdot s_K = 0{,}5\, V_S\ \pi DL\ n = n_{DS}\,,$$

де s_K – площа катода на стінках отвору.

Після підстановки вище визначених виразів довжина поверхні отвору, на якій спостерігається розряд при умовно лінійному законові розподілу напруженості поля дорівнює діаметру (координата середини розподілу знаходиться на відстані половини діаметра від торця отвору). Таким чином пояснюється той факт, що азотування отворів відносно великої довжини не може забезпечити модифікацію всієї поверхні отвору. В реальних умовах глибина модифікованої поверхні отвору може бути дещо більшою за рахунок ефекту звичайного газового азотування, проте результативність цієї складової незначна, оскільки в отворі відсутні умови для генерації атомарного азоту як потужного стимулятора процесу [6, 7], а молекулярні частки азоту, енергія яких відповідає рівню теплового руху, не сприяють азотуванню.

Прийнятий апріорі закон зміни напруги в осьовому напрямку отвору потребує уточнення, причому найбільш достовірний метод для вирішення подібної задачі – експериментальний, оскільки для аналітичного рішення потрібно найбільш ймовірно врахувати також обернений зв'язок між розподілом напруги та діаметром отвору, який, як показано вище в певній мірі лімітує інтенсивність потоку часток всередину отвору. При відомому законові розподілу напруги вздовж отвору середнє значення напруги

$$\overline{U} = \frac{\int_0^{2D} U(x)\, dx}{2D},$$

при цьому межа аналізу закону розподілу напруги $2D$ прийнята з огляду на дані, що наведені в [2, с. 103].

Перевід цих даних у відносні до діаметра отвору значення довжини та відносні стосовно напруги катодного падіння U_k значення розподілу напруги наведені в табл. 1, а графік взаємозалежностей цих величин – на рис. 2 (квадратами позначено експериментальні дані, суцільною лінією – апроксимація цих даних). При цьому рівнянням апроксимації є

$$\frac{U(x)}{U_k} = (1+x)^{-4.,5}$$

Таблиця 1

Відносні параметри розподілу напруги вздовж отвору

x/D	0	0,05	0,08	0,13	0,16	0,21	0,26	0,52	0,42	0,56	0,7	1	1,286	2
$U(x)/U_k$	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,05	0,01	0,005	0

З рис. 3 слідує, що середнє значення відносної напруги дорівнює 0,14, що відповідає відносній координаті x/D=0,55, яка незначно відрізняється від визначеної вище.

Очевидно, що відповідно до зміни розподілу напруги впродовж отвору будуть змінюватись і інші характеристики розряду, насамперед напруженість поля та ширина ОКП. В свою чергу, це вплине на всі субпроцеси модифікації аж до повного припинення її на певній відстані від торця отвору. Проте останній висновок не може бути однозначним по тій причині, що в певних випадках отворів великого діаметра спостерігається азотування по всій внутрішній поверхні, хоча відношення довжини отвору до діаметра значне. Подальші задачі можуть бути с формульованими, базуючись на класифікаційному аналізові ситуацій, що можуть мати місце при порівнянні розмірів отворів з параметрами розряду.

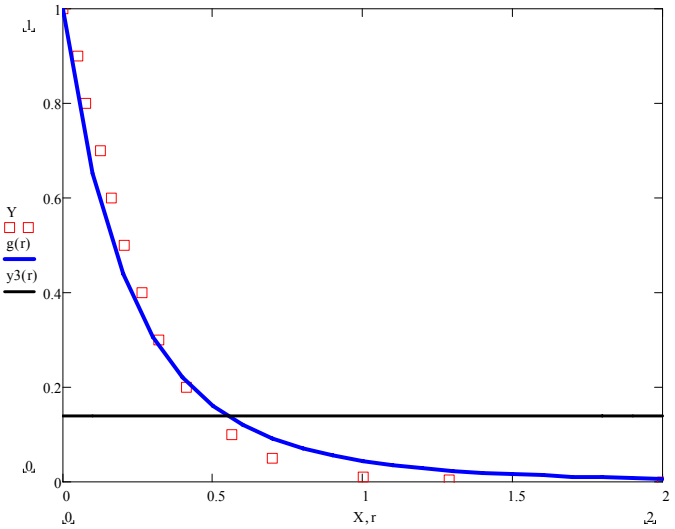

Рис. 2. Розподіл напруги вздовж отвору (у відносних параметрах табл. 1)

Варіанти співвідношень параметрів отворів та розряду

Очевидно, що вирішальну роль відіграватиме відношення діаметра отвору до ширини ОКП. По вказаному критерію можливі наступні ситуації.

1. Діаметр отвору менший подвійної ширини ОКП ($D < 2d$). В цьому випадку ОКП протилежних частин катода частково (в граничному випадку – повністю) перекриваються, схема відповідає умовам існування розряду з пустотілим катодом. Електрони при цьому перелітають через границю протилежної ОКП, входять в поле, яке гальмує їх рух аж до повної зупинки та повернення в «свою» область. У зв'язку з тим, що у напрямку до виходу з отвору напруга зростає, має місце осьова сила, яка рухає електрони в напрямку торця отвору. Електрони, таким чином, рухаються коливальною затухаючою траєкторією до виходу з отвору (рис. 3). Оскільки загальний шлях при цьому зростає, то це призводить до збільшення числа сутичок з нейтральними молекулами та інтенсивності іонізації. Це і становить головну причину появи в центральній частині отвору більш інтенсивного свічення як характерної ознаки розряду з пустотілим катодом. Закон коливального руху електронів повинен суттєво залежати від осьової координати вильоту його зі стінки отвору, оскільки падіння напруги, а відповідно напруженість поля, ширина ОКП залежать від відстані до торця отвору, враховуючи згаданий вище нерівномірний закон розподілу потенціалу вздовж отвору.

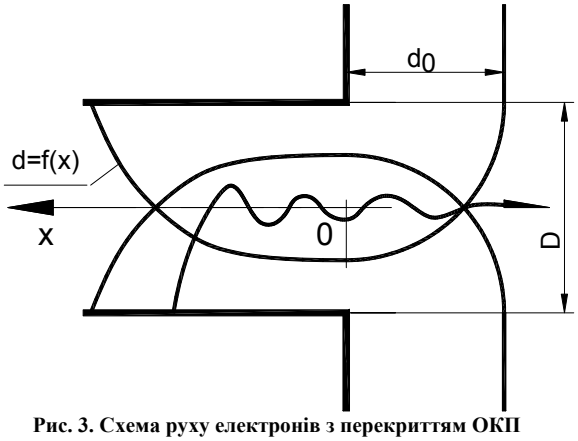

Рис. 3. Схема руху електронів з перекриттям ОКП

Для встановлення ефективності впливу особливостей руху електронів в області перекриття зон ОКП на енергетичні характеристики розряду необхідно дослідити кінетику їх руху, причому слід мати на увазі змінний характер ширини ОКП, викликаний падінням напруги впродовж отвору. Аналіз кінетики руху електронів окрім іншого повинен враховувати також, що відштовхування протилежним полем призводить до зміни швидкості, відповідно енергії електрона, зміщуючи її в область, яка або сприяє інтенсифікації іонізаційних процесів, або, навпаки – до їх пригнічення. Якщо енергія електронів при цьому ввійде в діапазон значень, найбільш сприятливих для іонізації (особливо – в приосьовій області), то це і стане важливим фактором зростання енергетики розряду, характерної для розряду з пустотілим катодом.

2. Діаметр отвору дорівнює подвійній ширині ОКП. Оскільки все рівно електрони за інерцією

залітають в протилежну зону ОКП (найбільш ймовірно – на величину середнього значення довжини вільного пробігу), то аналогічно попередньому спостерігатиметься ефект розряду з пустотілим катодом, хоча і в меншій мірі. Аналогічні ділянки мають місце і на рис. 3 в тих місцях, де перекриття зон ОКП тільки починається, тому аналітичний апарат можна використати той же, що і в попередньому випадку.

3. Діаметр отвору дещо більший подвоєної ширини ОКП. В центрі отвору залишається область, в якій поле не діє (площа цієї ділянки $0{,}25\ \pi(D-2\delta)^2$). Через цю центральну частину проходить постачання дифузантів пропорційно тій частині струму розряду, яка проходить через приторцеву частину поверхні (з врахуванням нерівномірності розподілу напруги в цій же приторцевій частині отвору). Ймовірно може мати і місце обернена причина – гальмування постачання по законам, аналогічним гідродинаміці, що і визначає обмеженість внутрішньої області отвору, яка потенційно може азотуватись. Цей опір рухові часток через торець в якості основоположних факторів може мати як критичну швидкість дрейфу часток, так і так і сутичковий характер руху часток (вплив параметрів технологічного режиму на довжину вільного пробігу, ймовірності відбиття часток в певному напрямку після сутички, резонансної перезарядки та інших субпроцесів).

4. Діаметр отвору значно перевищує подвоєну ширину ОКП. Через центральну частину отвору при допустимій критичній швидкості дрейфу часток газового середовища, яка визначається цілою низкою факторів, згаданих в п. 3, внутрішня порожнина модифікованого об'єкту постачається компонентами газу, які служать основою для утворення нітридів. Саме ця критична швидкість стоку лімітує площу стінок отвору, яка може азотуватись, оскільки для більш-менш рівномірного розподілу часток по всій внутрішній поверхні отвору їх кількість повинна бути достатньою для всіх субпроцесів азотування. Ймовірно існує критичне значення між співвідношеннями діаметра отвору до подвоєної ширини ОКП та довжини отвору до його діаметра (можливий варіант – внутрішньої площі отвору до площі отвору без площі перетину ОКП), що потребує додаткового дослідження.

Висновок

Проведений аналіз вказує на певні обмеження азотування отворів з відносно малим діаметром при використанні традиційних варіантів технології азотування в тліючому розряді. Оскільки навіть при малих значеннях відношення довжини отвору до його діаметра важко забезпечити наявність розряду по всій внутрішній поверхні отвору, то інтенсивність процесів утворення нітридів лімітується тільки параметрами газового азотування, продуктивність якого, як відомо, суттєво нижча у порівнянні з азотуванням із застосуванням газорозрядних процесів. Подальші дослідження повинні стосуватись кінетики руху часток газу в умовах дії нестаціонарного живлення. Саме в цьому випадку ймовірне попадання іонізованих часток поза межі приторцевої зони отвору, що може стати причиною інтенсифікації азотування внутрішніх поверхонь отвору.

Література

1. Пастух І. М. Особливості азотування в тліючому розряді з нестаціонарним живленням отворів з відносно малим діаметром / І. М. Пастух, В. В. Люховець, В. С. Курской // Вісник ХНУ. Технічні науки. – 2013. – № 3. – С. 195–199.

2. Москалев Б. И. Разряд с полым катодом / Б. И. Москалев. – М. : Энергия,1969. – 184 с.

3. Kwon S. C., Lee G. H., Yoo M. C. A comparative study between pulsed and D. C. ion nitriding behavior in specimens with blind holes. 1st International conference of ion nitriding. – Cleveland, Ohio. – 1986. – P. 77–81.

4. Guntershulze A. Zeitschrift fur Phisyk, 1930, 11, 49.

5. Пастух И. М. Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде / И. М. Пастух. – Х. : Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», 2006. – 364 с.

6. Лахтин Ю. М. Азотирование стали / Ю. М. Лахтин, Я. Д. Коган. – М. : Машиностроение, 1976. – 256 с.

7. Ионная химико-термическая обработка сплавов / [Б. Н. Арзамасов, А. Г. Братухин, Ю. С. Елисеев, Т. А. Панайоти]. – М. : Изд-во МГТУ им Н. Э. Баумана, 1999. – 400 с.

References

1. Pastuh I. M., Lyuhovets V. V., Kurskoy V. S. OsoblivostI azotuvannya v tlIyuchomu rozryadI z nestatsIonarnim zhivlennyam otvorIv z vIdnosno malim dIametrom // VIsnik HNU, №3, 2013, TehnIchnI nauki. S. 193-195.

2. Moskalev B. I. Rozrjad s polym katodom Moskva / Energia, 1969. – 184 p.

3. Kwon S. C., Lee G. H., Yoo M. C. A comparative study between pulsed and D. C. ion nitriding behavior in specimens with blind holes // 1st International conference of ion nitriding. – Cleveland, Ohio. – 1986. – P. 77-81.

4. Guntershulze A. Zeitschrift fur Phisyk, 1930, 11,49

5. Pastukh I. M. Theorija i praktyka bezvodorodnogo azotirovania v tleushchem razrjade. – Kharkov, Natsionalnyi nauchnyi tsentr "Kharkovskyi fiziko-tekhnicheskyi institut". 2006 – 364 s.

6. Lakhtin J. M., Kogan J. D. Azotirovanie stali – M.: Mashinostrojenie, 1976. – 256 s.

7. Ionnaja himiko-termicheskaja obrabotka splavov / B. N. Arzamasov I dr. – M.: Iz-stvo MGTU im. N. E. Baumana, 1999. – 400 s.

Рецензія/Peer review : 15.4.2014 р. Надрукована/Printed :25.9.2014 р.
Стаття рецензована редакційною колегією